

## ГАРМОНИКИ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ 12-ПУЛЬСОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

проф. В.Е. Пустоваров, В.В. Оробинский, к.т.н. В.В. Шевченко

*Предложен приближенный метод расчета гармоник выпрямленного напряжения многопульсовых выпрямителей.*

**Постановка проблемы.** В настоящее время на промышленных предприятиях в общей структуре электрических нагрузок значительное место занимают нелинейные нагрузки. Их источниками являются в первую очередь различного рода вентильные преобразователи (ВП), главным образом тиристорные, установки дуговой и контактной электросварки, дуговые сталеплавильные печи и рудно-термические печи, газоразрядные лампы, силовые магнитные усилители и трансформаторы. Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной, а в некоторых случаях и непериодической; в результате возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, несинусоидальные режимы.

Несинусоидальные режимы неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие в результате высшие гармоники (ВГ) негативно сказываются на показателях качества электроэнергии. Экономические ущербы обусловлены главным образом ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования. Иногда имеет место ухудшение качества и уменьшение количества выпускаемой продукции.

Основной круг вопросов, составляющих содержание этой проблемы, сводится к следующим: оценке электромагнитной совместимости источников ВГ и других нагрузок, т.е. влияния ВГ на электроустановки и возникающего при этом экономического ущерба; количественной оценке ВГ тока, генерируемых различными нелинейными нагрузками, и прогнозированию значений ВГ тока и напряжения в системах электроснабжения; снижению уровней ВГ.

**Анализ литературы.** Одним из источников ВГ являются различного рода выпрямительные устройства. Анализ значений ВГ выпрямленного напряжения (табл. 1) показывает, что чем выше число пульсаций выпрямленного напряжения  $q$  за период, тем меньше содержание высших гармо-

нических, а следовательно, качество выпрямленного напряжения повышается [1]. Это оправдывает целесообразность применения многопульсовых выпрямителей, в частности 12-пульсовых.

Таблица 1

Эффективные значения высших гармонических составляющих  
выпрямленного напряжения в процентном выражении

Номер и частота высшей гармонической составляющей		Число пульсаций, q							
		2		3		6		12	
n	f, Гц	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}},$ %	$\frac{I_{l(n)}}{I_{l(1)}},$ %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}},$ %	$\frac{I_{l(n)}}{I_{l(1)}},$ %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}},$ %	$\frac{I_{l(n)}}{I_{l(1)}},$ %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}},$ %	$\frac{I_{l(n)}}{I_{l(1)}},$ %
2	100	41,14			50,00				
3	150		33,33	17,68					
4	200	9,43			25,00				
5	250		20,00		20,00		20,00		
6	300	4,04		4,04		4,04			
7	350		14,29		14,29		14,29		
8	400	2,24			12,50				
9	450		11,11	1,77					
10	500	1,43			10,00				
11	550		9,09		9,09		9,90		0,99
12	600	0,99		0,99		0,99		0,99	
13	650		7,69		7,69		7,69		7,69
14	700	0,73			7,14				
15	750		6,67	0,63					
16	800	0,55			6,25				
17	850		5,88		5,88		5,88		
18	900	0,44		0,44		0,44			
19	950		5,26		5,26		5,26		
20	1000	0,35			5,00				
21	1050		4,76	0,32					
22	1100	0,29			4,55				
23	1150		4,35		4,35		4,35		4,35
24	1200	0,25		0,25		0,25		0,25	
25	1250		4,00		4,00		4,00		4,00

*Примечание:* В табл. 1  $U_{d(n)}/U_{d0}$  – значение ВГ выпрямленного напряжения в процентном выражении среднего значения выпрямленного напряжения;  $I_{l(n)}/I_{l(1)}$  – значение первичного тока в процентном выражении основной гармонической составляющей тока.

В реальных условиях несинусоидальность напряжений сети переменного тока характеризуется присутствием не одной, а многих ВГ. При этом каждая из них оказывает соответствующее влияние на спектральный состав, амплитуды, и начальные фазы ЭДС гармоник выпрямителя. Основными влияющими параметрами являются порядок, амплитуды и

начальные фазы гармоник сети переменного тока, а также нагрузочное состояние выпрямителя [2].

Однако, при симметричных питающих напряжениях наличие в сети переменного тока неканонических гармоник ( $v = 5, 7, 17, 19, \dots$ ) не оказывает существенного влияния на значения ЭДС гармоник порядка  $n = 12k$  ( $f = 600, 1200, 1800$  Гц, ...) и приводит к появлению гармоник порядка  $n = 6k$  при нечетных  $k$  ( $f_n = 300, 900, 1500$  Гц, ...). Значения ЭДС этих гармоник зависят от начальных фаз  $\psi_A$  и амплитуд  $v$ -х гармоник. Наличие в сети переменного тока канонических гармоник ( $v = 11, 13, 23, 25, \dots$ ) не приводит к появлению в составе ЭДС 12-пульсового выпрямителя гармоник порядка  $n = 6k$  при нечетных  $k$  ( $f_n = 300, 900, 1500$  Гц, ...) и оказывает значительное влияние на значения ЭДС гармоник порядка  $n = 12k$ .

Наличие мощных однофазных нагрузок, например электрической тяги переменного тока, приводит к появлению несимметрии напряжений в электрических системах. В этом случае по мере увеличения несимметрии питающих напряжений (при  $a_U \ll 10\%$ ) при прочих неизменных условиях ЭДС гармоник 600, 1200, 1800 Гц, ... снижаются, а всех остальных возрастают. Наибольшее значение ЭДС канонических гармоник (600, 1200, 1800 Гц, ...) наблюдается при симметричных питающих напряжениях [3].

Сравнение ЭДС гармоник 6- и 12-пульсовых выпрямителей при несимметричных синусоидальных питающих напряжениях показывает, что гармоники 100, 600, 1200, 1800 Гц, ..., у таких преобразователей при холостом ходе практически одинаковы, а гармоники 500, 700, 1100, 1300 Гц, ... близки по значению. При одинаковой нагрузке и прочих равных условиях углы коммутации у 12-пульсовых выпрямителей меньше, чем у 6-пульсовых. При номинальной нагрузке коэффициент коммутации  $\delta$  у 6-пульсового выпрямителя может достигать значений 0,3 ... 0,35, а у 12-пульсового чаще всего не превышает 0,2. Поэтому при нагрузке у 12-пульсового выпрямителя, как при симметричных, так и при несимметричных питающих напряжениях, ЭДС названных выше гармоник меньше, чем у 6-пульсового. ЭДС гармоник 200, 300, 400, 800, 900, 1000 Гц, ... у 12-пульсового выпрямителя значительно меньше, чем у 6-пульсового.

Во многих электрических системах, от которых получают питание подстанции постоянного тока, напряжения являются в большей или меньшей степени и несимметричными, и несинусоидальными [3]. При наличии одновременно и несимметрии, и несинусоидальности количество факторов, оказывающих влияние на спектральный состав ВГ, возрастает. Это значительно усложняет не только расчетные формулы, но и прогнозирование исходной информации на стадии проектирования. Кроме того, это вызывает необходимость включать в состав сглаживаю-

ших фильтров дополнительные резонансные контуры или устраивать специальные двухзвенные или аperiодические фильтры [4].

**Цель статьи** – рассмотреть приближенный метод расчета гармоник выпрямленного напряжения многопульсовых выпрямителей. Кривая выпрямленного напряжения многопульсовых преобразователей, особенно с учетом несимметричных режимов работы, имеет сложную форму и аналитически записывается совокупностью дифференциальных уравнений по отдельным интервалам периода кривой питающего напряжения. В общем виде формулы для определения высших гармонических в кривой выпрямленного напряжения, записанные в виде коэффициентов Эйлера ряда Фурье, имеют довольно громоздкий вид и требуют использования современной вычислительной техники. С целью снижения трудоемкости этих расчетов разработана упрощенная инженерная методика по вычислению высших гармонических выпрямленного напряжения многофазных преобразователей по значениям гармоник 6-пульсового преобразователя.

Зная амплитуды и начальные углы гармонических составляющих выпрямленного напряжения 6-пульсового выпрямителя, можно с достаточной степенью точности определить амплитуды и начальные фазы гармоник выпрямленного напряжения многофазного преобразователя по формуле:

$$U_k^m = \frac{U_k^6}{n} e^{j\varphi_{k6}} \sum_{i=1}^n e^{j\frac{360}{m}(i-1)k} = U_k^6 K_m e^{j(\varphi_{k6} + \varphi_{km})}, \quad (1)$$

где  $U_k^6$  – амплитуда гармоники выпрямленного напряжения 6-пульсового преобразователя, В;  $\varphi_k^6$  – начальная фаза  $k$ -й гармоники 6-пульсового преобразователя;  $m$  – количество пульсаций выпрямленного напряжения за период питающего напряжения;  $n$  – количество трехфазных мостов, или  $n = m/6$ ;  $i$  – текущая координата трехфазного моста,  $i = 1, 2, 3, 4 \dots$ ;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды многопульсового преобразователя по сравнению с 6-пульсовым;

$$K_m = \frac{1}{n} \sqrt{\left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \left[ \cos \frac{2\pi}{m}(i-1)k \right] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \sin \frac{2\pi}{m}(i-1)k \right] \right\}^2}; \quad (2)$$

$\varphi_{km}$  – угол, учитывающий изменение угла начальной фазы  $k$ -й гармоники многопульсового преобразователя по сравнению с 6-пульсовым:

$$\varphi_{km} = \arctg \left( \frac{\sum_{i=1}^n \sin \frac{2\pi}{m}(i-1)k}{1 + \sum_{i=1}^n \cos \frac{2\pi}{m}(i-1)k} \right). \quad (3)$$

При расчете гармонических составляющих выпрямленного напряжения для сложных мостовых схем на основании известных значений гармоник 6-пульсового выпрямителя необходимо учитывать, что увеличение числа пульсаций  $m$  выпрямленного напряжения приводит к уменьшению угла коммутации при одинаковой нагрузке выпрямителей. Кроме этого, преобразователь при переходе от 6-пульсового к 12-пульсовому изменяет угол начальной фазы.

**Пример.** Определим амплитуду и начальную фазу 8-й и 16-й гармоник 12-пульсового выпрямителя, основываясь на амплитудах и начальных фазах этих гармоник 6-пульсового выпрямителя.

По графикам (рис. 1, 2) [3] определим амплитуды  $U_k$  и начальные фазы  $\phi_k$  8-й и 16-й гармоник 6-пульсового выпрямителя при угле коммутации  $\gamma = 15^\circ$ :  $U_8^6 = 14,5$  В;  $\phi_8^6 = 225^\circ$  и  $U_{16}^6 = 7,5$  В;  $\phi_{16}^6 = 110^\circ$  соответственно.

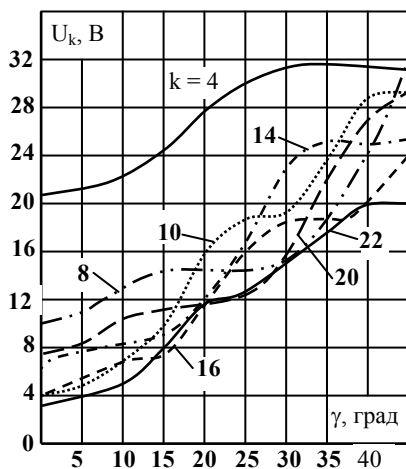


Рис. 1. Величины гармонических составляющих выпрямленного напряжения на выходе 6-пульсового выпрямителя

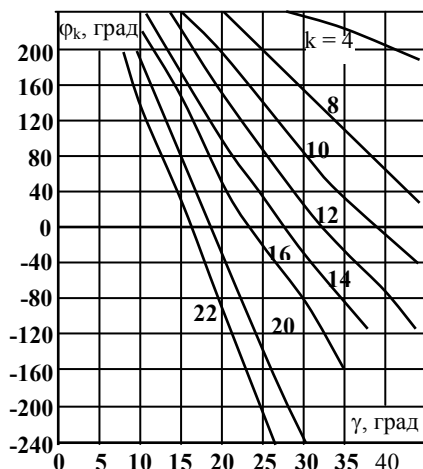


Рис. 2. Зависимости начальных фаз гармоник  $\phi_k$  от угла коммутации

По формулам (1) и (3) определяем амплитуды напряжений и начальные фазы 8-й и 16-й гармоник, которые равны  $U_8 = 12,56$  В;  $\phi_8 = 195^\circ$  и  $U_{16} = 6,89$  В;  $\phi_{16} = 140^\circ$  соответственно. Полученные расчетным путем результаты не противоречат теоретическим [2].

**Выводы:** 1. Можно отметить, что чем больше количество пульсаций выпрямленного напряжения, т.е. выше порядок пульсового напряжения, тем меньше содержание высших гармонических составляющих.

2. Расчет спектра ВГ можно вести упрощенным способом, основываясь на расчетах спектра ВГ выпрямителей с меньшим количеством пульсаций, т.е. методику расчета спектра ВГ 12-пульсовых выпрямителей можно ис-

пользовать для расчета спектра ВГ 24-пульсовых выпрямителей, а также, в перспективе, и для выпрямителей с большим числом пульсаций выпрямленного напряжения за период.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков А.Т. *Электронная техника и преобразователи*. – М., Транспорт, 1999. – 657 с.
2. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий*. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 265 с.
3. Бадер Д. М. *Электромагнитная совместимость*. – М., Транспорт, 2002. – 464 с.
4. *Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций* / Б.С. Барковский, Г.С. Магай, В.П. Маценко и др.; Под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

Поступила 21.07.2003

**ПУСТОВАРОВ Владимир Евгеньевич**, канд. техн. наук, профессор, профессор УИПА. В 1961 году окончил Харьковское высшее военное авиационно-инженерное училище. Область научных интересов – радиоэлектроника и электроэнергетика. E-mail: vladimir@ic.kharkov.ua.

**ОРОБИНСКИЙ Виталий Вячеславович**, магистр УИПА. В 2002 году окончил Украинскую инженерно-педагогическую академию. Область научных интересов – электроэнергетика.

**ШЕВЧЕНКО Валентина Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры “Электроэнергетики” УИПА. В 1977 году окончила ХПИ им. В.И. Ленина. Область научных интересов – электрические машины, нетрадиционные источники энергии.

---

УДК 621.382

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

к.т.н. А.П. Батуков, к.т.н. В.В. Скляр, В.В. Дегтяренко  
(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

*Задача обеспечения живучести решена путем нового метода выбора критериальной функции, параметрами которой являются вероятность поражения элементов системы и структура системы.*

**Постановка проблемы.** Увеличение сложности современных распределенных автоматизированных систем управления технологическими процессами, глобализация сетей связи и сети Internet, развития электро-